

*На правах рукописи*



Новиков Алексей Витальевич

**SiGe гетероструктуры, выращенные на различных подложках:  
релаксация упругих напряжений, люминесценция и селективное  
легирование**

01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород – 2021

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», (ИФМ РАН), Нижний Новгород

Официальные оппоненты:

Егоров Антон Юрьевич,  
доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН,  
технический директор ООО «Коннектор  
Оптикс»

Зотов Андрей Вадимович  
доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН,  
профессор, заведующий лабораторией,  
ФГБУН Институт автоматизации и  
процессов управления ДО РАН

Эрвье Юрий Юрьевич,  
доктор физико-математических наук,  
профессор,  
Томский государственный университет

Ведущая организация: ФГБУН Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Защита состоится 6 июля 2021 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.037.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск:

<https://www.isp.nsc.ru/institut/dissertatsionnyj-sovet/zasedaniya/novikov-aleksej-vitalevich>

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

Погосов А.Г.

## Общая характеристика работы

### Актуальность и степень разработанности темы исследования

Развитие методов эпитаксиального роста кардинально расширило возможности по созданию полупроводниковых структур с заданными свойствами. Это, в том числе, касалось и такого традиционного метода модификации свойств полупроводников как легирование, так как при эпитаксиальном росте структур возможно создание сложных профилей распределения примеси, концентрация которой в легированных областях может значительно превосходить равновесную растворимость электрически активной примеси в полупроводнике (см., например, [1]). Но наиболее значительный прогресс в управлении свойствами полупроводниковых структур при использовании эпитаксии был достигнут за счет формирования гетероструктур [2]. Благодаря возможностям гетероэпитаксии, которая позволяет менять не только тип и величину проводимости, но и многие другие параметры полупроводников, такие как, ширину запрещенной зоны, диэлектрическую проницаемость, подвижность носителей заряда и спектр их электронных состояний, были не только значительно улучшены характеристики традиционных электронных полупроводниковых приборов [3], но и созданы принципиально новые приборы - полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов [4], гетеролазеры на квантовых ямах [2] и квантовых точках [5], а также квантово-каскадные лазеры [6].

Одним из обстоятельств, которое необходимо учитывать при гетероэпитаксии полупроводниковых структур, является рассогласование кристаллических решеток различных материалов их составляющих. Среди существующих напряженных полупроводниковых гетероструктур к настоящему времени наиболее изученными гетеропарами являются InAs/GaAs и Ge/Si. Интерес к этим гетеропарам во многом обусловлен их широким использованием в современной нано- и оптоэлектронике. Кроме этого, гетеропара Ge/Si является своего рода модельной системой для исследования влияния упругих напряжений на эпитаксиальный рост полупроводниковых структур.

Многочисленные исследования этих и других гетеропар показали, что при росте гетероструктур необходимо учитывать даже относительно небольшое рассогласование кристаллических решеток между формируемой структурой и подложкой. Во многом это вызвано различными процессами

релаксации упругих напряжений в полупроводниковых гетероструктурах, которые могут приводить к изменению поверхностной реконструкции атомов, образованию дефектов кристаллической решетки, смене механизма роста с планарного на островковый, а также ускоренному диффузионному перемешиванию (для SiGe гетеросистемы см. обзоры [7 - 9]). Исследования, посвященные процессам релаксации упругих напряжений в полупроводниковых гетероструктурах, остаются одними из наиболее актуальных в физике полупроводников. Именно хорошее понимание этих процессов позволило использовать их для решения ряда важных задач: пластическую релаксацию упругих напряжений - для создания искусственных подложек на основе релаксированных буферов [7], а релаксацию за счет развития шероховатости поверхности – для получения структур с самоформирующимися квантовыми точками и наноструктурами [10 - 12].

К началу 2000-х годов для гетеросистем Ge/Si и InAs/GaAs были достаточно хорошо исследованы процессы релаксации упругих напряжений, происходящие в одно- и многослойных структурах со сжатыми слоями [7-9]. При этом, как показал обзор результатов этих исследований, представленный в главе 1, имелось лишь небольшое число работ, посвященных особенностям релаксации упругих напряжений в растянутых слоях в этих гетеропарах [13, 14], и практически отсутствовали работы по релаксации упругих напряжений в структурах, содержащих слои, различающиеся знаком и величиной деформации. В тоже время, одним из направлений развития полупроводниковых приборов и устройств является усложнение их дизайна, которое проявляется в наличии в одной структуре слоев, различающиеся составом, знаком и величиной деформации. Выявлению особенностей релаксации упругих напряжений через развитие шероховатости в таких структурах посвящена первая глава диссертации.

Наиболее ярким результатом исследований роста напряженных полупроводниковых гетероструктур можно назвать обнаружение в начале 90-х годов прошлого столетия того факта, что одной из стадий релаксации упругих напряжений в них является формирование массива когерентных, бездефектных самоформирующихся наноструктур и квантовых точек (КТ) [10 - 12]. Для гетеропары InAs/GaAs это привело к созданию лазеров на КТ с рекордными характеристиками [5] и расширению спектрального диапазона оптоэлектронных приборов на GaAs подложках до практически важного

спектрального диапазона 1.3-1.55 мкм [15]. Излучательные свойства самоформирующихся наностроек в системе Ge/Si также привлекли к себе внимание благодаря спектральному расположению их сигнала люминесценции в области 1.55 мкм, которая недостижима в планарных SiGe гетероструктурах [16]. Практический интерес к люминесценции GeSi наностроек значительно возрос после того, как несколько групп продемонстрировали, что их сигнал люминесценции наблюдается при оптической и электрической накачке вплоть до комнатной температуры [17, 18] и может иметь высокую для структур на основе кремния эффективность [19]. Дополнительным преимуществом структур с Ge(Si) островками по сравнению с другими материалами, рассматриваемыми для создания источников излучения на кремнии, является относительная простота их дизайна, которая значительно упрощает решение задачи по интеграции структур с Ge(Si) островками в разрабатываемые системы кремниевой оптоэлектроники [20]. Совокупность перечисленных факторов сделала структуры с Ge(Si) самоформирующимися наностройками одним из перспективных материалов для создания на кремнии источников излучения ближнего ИК диапазона для оптоэлектронных приложений.

Было установлено, что сигнал люминесценции Ge(Si) островков связан с непрямой в реальном пространстве излучательной рекомбинацией между дырками, локализованными в островках и электронами, находящимися в кремниевой матрице на гетерогранице с островком [21, 22]. В тоже время, несмотря на достаточно большое число работ, посвященных излучательным свойствам Ge(Si) самоформирующихся наностроек, не была установлена однозначная связь между спектральным положением сигнала люминесценции островков и их параметрами. Во многом это было обусловлено тем, что при интерпретации спектров люминесценции островков, образованных при осаждении Ge на Si(001), не учитывалась ускоренная упругими напряжениями диффузия Si в островки [23] и связанная с ней сильная зависимость состава Ge(Si) островков от условий роста и параметров структур [24]. Одним из следствий отсутствия должного понимания в этом вопросе являлось плохое понимание, какие параметры Ge(Si) островков определяют эффективность их люминесценции при комнатной температуре. Кроме того, не были предложены и реализованы подходы, которые позволяли бы контролируемым образом менять спектральное положение и ширину сигнала люминесценции островков.

Решению отмеченных вопросов, касающихся излучательных свойств Ge(Si) островков, посвящены вторая и третья главы диссертации.

Тенденции в развитии современной наноэлектроники, связанные с уменьшением размеров активных областей п/п приборов и использованием гетероструктур, предъявляют новые требования и к традиционному методу модификации свойств полупроводников за счет их легирования. Уменьшение толщин отдельных слоев в приборных структурах делает актуальной задачу развития методов контролируемого легирования, которые обеспечивали бы резкие градиенты распределения легирующих примесей, включая создание дельта-легированных областей [1]. Для эпитаксиальных структур решение этой задачи в значительной мере осложняется эффектом сегрегации, который проявляется для многих донорных и акцепторных примесей. Развитие методов селективного легирования напряженных гетероструктур требует еще и дополнительных знаний о зависимости поведения примеси от состава и упругих напряжений отдельных слоев в структуре. Немаловажным критерием, предъявляемым к развиваемым методам легирования полупроводников, является их относительная простота, дешевизна и воспроизводимость. Можно отметить, что, несмотря на большой объем работ, посвященных этой задаче, обзор которых представлен в четвертой главе, к началу 2010-х годов не было предложено метода легирования донорами SiGe структур, который удовлетворял бы всем вышеперечисленным требованиям. Установлению зависимостей сегрегационных свойств Sb от условий роста и параметров SiGe структур и развитию на основе полученных зависимостей оригинального метода селективного легирования эпитаксиальных структур на основе Si и Ge сегрегирующими примесями посвящена четвертая глава диссертации.

#### **Цели и задачи диссертационной работы**

- Выявление влияния знака деформации SiGe слоев на процессы релаксации упругих напряжений в них. Использование напряженных подслоев для управления сменой механизма роста SiGe структур с планарного на островковый.
- Установление для одно- и многослойных структур с Ge(Si)/Si(001) самоформирующимися наноостровками связи между спектральным положением сигнала люминесценции островков и их параметрами. Определение основных параметров Ge(Si) островков, оказывающих влияние на интенсивность их сигнала люминесценции при комнатной температуре.

Получение структур с Ge(Si) островками, демонстрирующих интенсивный сигнал фото- и электролюминесценции при комнатной температуре в области длин волн 1.3-1.55 мкм.

- Развитие подходов к управлению спектральным положением и шириной сигнала люминесценции Ge(Si) островков.

- Установление зависимости сегрегационных свойств сурьмы в эпитаксиальных структурах на основе Si и Ge от условий роста и параметров структур. Использование этих зависимостей для развития метода селективного легирования SiGe гетероструктур сегрегирующими примесями.

### **Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы определяется оригинальностью полученных результатов, которые опубликованы в международных и российских научных журналах. Научную новизну работы кратко можно сформулировать следующим образом:

1. Для напряженных SiGe гетероструктур, выращенных на подложках с кристаллографической ориентацией (001), впервые экспериментально установлена связь знака деформации с характером процессов релаксации упругих напряжений в них через развитие шероховатости поверхности и образование самоформирующихся наноостровков и квантовых точек. Продемонстрировано, что различное влияние деформации сжатия и растяжения на развитие шероховатости поверхности способствует переходу от двумерного к трехмерному росту для SiGe слоев, испытывающих деформацию сжатия, и препятствует такому переходу для слоев с деформацией растяжения.

2. Показана количественная связь между параметрами Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков (размерами, составом и формой) и спектральным положением их сигнала люминесценции, обусловленного непрямым в реальном пространстве оптическим переходом между дырками, локализованными в Ge(Si) островках, и электронами, находящимися в локально растянутых областях кремния на гетерогранице с островком.

3. Установлено, что пространственная локализация электронов и дырок в структурах с Ge(Si) островками за счет их встраивания между тонкими слоями растянутого Si приводит к росту вероятности бесфононной излучательной рекомбинации носителей заряда в них.

4. Впервые продемонстрировано, что зависимость сегрегационных свойств сурьмы от температуры в эпитаксиальных структурах на основе

кремния и германия может быть описана в предположении существования двух механизмов сегрегации, на террасах и ступенях, имеющих различные энергии, их характеризующие. Уменьшение значений этих энергий при увеличении доли Ge в SiGe гетероструктурах связывается с меньшей энергией связи атомов в Ge по сравнению с Si. Продемонстрировано, что температурная зависимость коэффициента сегрегации сурьмы в SiGe структурах может быть использована для их селективного легирования.

### **Научная и практическая значимость работы**

Полученные в работе новые экспериментальные данные вносят существенный вклад в понимание процессов релаксации упругих напряжений в полупроводниковых гетероструктурах, люминесцентных свойств Ge(Si) самоформирующихся nanoостровков, сегрегационных свойств сурьмы в SiGe гетероструктурах. Научная и практическая значимость работы состоит следующем:

- Для SiGe гетероструктур, выращенных на подложках с кристаллографической ориентацией (001), экспериментально установлено различие во влиянии сжатых и растянутых планарных, напряженных SiGe подслоев на последующий рост структур. Показано, что предосаждение сжатых SiGe слоев ведет к уменьшению критической толщины двумерного роста пленки Ge на них, а растянутых – к увеличению. Выявлено, что влияние захороненных напряженных SiGe подслоев на дальнейший рост структуры сохраняется и при их заращивании тонкими (толщиной в единицы нанометров) ненапряженными слоями. Экспериментально установленное различное влияние напряженных SiGe подслоев с различным знаком деформации на дальнейший рост SiGe структур на подложках с кристаллографической ориентацией (001) необходимо учитывать при формировании приборных структур, дизайн которых предполагает наличие в них нескольких напряженных слоев.

- Показано, что сигнал люминесценции Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков, связанный с непрямым в реальном пространстве оптическим переходом, может наблюдаться при энергиях, существенно меньших ширины прямой запрещенной зоны объемного Ge.

- Выявлено, что для структур, выращенных на Si(001) подложках, наиболее интенсивный сигнал люминесценции в области длин волн 1.3-1.8 мкм при комнатной температуре наблюдается от многослойных структур с Ge(Si) nanoостровками, сформированными за счет осаждения Ge при



оптимальной температуре 600<sup>0</sup>С, когда реализуется наиболее эффективная пространственная локализация носителей заряда.

- Показано, что пространственная локализация носителей заряда в Ge(Si) островках и их окрестностях делает люминесцентные свойства островков менее чувствительными к объемным и поверхностным дефектам структуры, что позволяет использовать светоизлучающие структуры с Ge(Si) островками в различных микрорезонаторах и радиационно-стойких устройствах.

- Получены макеты светодиодов с Ge(Si)/Si(001) самоформирующимися наноструктурами, излучающие в области длин волн 1.3-1.8 мкм с внешней квантовой эффективностью ~0.01% при комнатной температуре. Продемонстрирована возможность использования полученных светодиодов для реализации оптической связи между структурами, сформированными на кремнии.

- Показана возможность управления люминесцентными свойствами Ge(Si) островков (вероятностью оптического перехода без участия фонона, спектральным положением и шириной сигнала люминесценции) за счет их встраивания между слоями растянутого Si, выращенными на релаксированных SiGe/Si(001) буферах или подложках «напряженный кремний на изоляторе». Данный подход позволил получить наиболее длинноволновый для эпитаксиальных SiGe гетероструктур сигнал межзонной люминесценции (вплоть до 2 мкм) и рекордно узкую для массива неупорядоченных Ge(Si) островков линию фотолюминесценции (20-30 мэВ при температуре 20 К).

- На основе анализа температурной зависимости сегрегационных свойств сурьмы предложен и экспериментально реализован метод селективного легирования донорами Si и Ge гомоэпитаксиальных структур, а также гетероструктур на их основе. Предложенный метод позволяет получать в SiGe гетероструктурах, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), однородно легированные сурьмой слои с градиентом распределения примеси на их границах в 2-3 нм на декаду и δ-легированные слои с шириной на полувысоте 2-3 нм. Полученные легированные слои характеризуются высоким кристаллическим качеством. Показано, что предложенный метод селективного легирования может быть использован для формирования омических контактов и создания низкочастотных диодов Шоттки на основе кремния. Разработанный в диссертации

метод легирования прост и не требует для своей реализации никакого дополнительного оборудования для установок МПЭ.

### **Методы исследования**

Исследованные в работе SiGe гетероструктуры были выращены на различных подложках методом МПЭ, являющимся одним из основных методов роста полупроводниковых гетероструктур. Рост структур контролировался *in situ* методом дифракции быстрых электронов, который позволял определять состояние их поверхности, момент смены механизма роста с двумерного на островковый и тип формируемых островков. Характеризация выращенных структур производилась с использованием таких методов как: атомно-силовая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгенодифракционный анализ, спектроскопия люминесценции, вторичная ионная масс-спектрометрия, измерение эффекта Холла и др. Непротиворечивость результатов, полученных в диссертации с использованием различных методов, может служить подтверждением их достоверности.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. При росте напряженных гетероструктур SiGe на подложках с кристаллографической ориентацией (001) существенное влияние на процессы релаксации упругих напряжений в них, кроме рассогласования постоянных кристаллической решетки пленки и подложки, оказывает знак деформации. Это влияние обусловлено зависимостью от знака деформации энергии моноатомных ступеней на поверхности (001) с реконструкцией атомов (2×1), которая уменьшается при приложении деформации сжатия и растет при деформации растяжения. При формировании растянутых SiGe слоев увеличение энергии моноатомных ступеней на (2x1) реконструированной поверхности (001) препятствует развитию шероховатости поверхности роста и, как следствие, зарождению бездефектных островков.
2. Изменение шероховатости поверхности роста и сегрегация Ge в результате осаждения напряженных SiGe слоев могут быть использованы для управления последующим ростом напряженных структур. Предосаждение планарных, сжатых SiGe слоев ведет к уменьшению критической толщины двумерного роста на них SiGe слоев с высокой долей Ge, а растянутых – к увеличению. Воздействие напряженных SiGe подслоев на рост структур сохраняется и при их заращивании тонкими ненапряженными слоями.

3. Основным фактором, определяющим спектральное положение сигнала люминесценции куполообразных Ge(Si) островков, образующихся при осаждении Ge на Si(001) при  $T \geq 600^\circ\text{C}$ , является их состав, зависящий от температуры роста. На положение сигнала люминесценции hut-кластеров, формируемых при низких ( $T \leq 550^\circ\text{C}$ ) температурах, кроме состава существенное влияние оказывает также и их размер в направлении роста.

4. Интенсивность сигнала люминесценции при комнатной температуре от структур с Ge(Si)/Si(001) самоформирующимися островками в значительной мере определяется глубиной потенциальных ям для носителей заряда в островках и их окрестностях. При молекулярно-пучковой эпитаксии наиболее интенсивный сигнал люминесценции при комнатной температуре наблюдается для многослойных структур с куполообразными наноструктурами, выращенных при температуре роста  $600^\circ\text{C}$ . Это связывается с реализацией в данном типе структур наиболее глубоких потенциальных ям для дырок в островках и электронов в кремнии на гетерогранице с островком.

5. Для структур с Ge(Si) самоформирующимися наноструктурами, встроенными между слоями растянутого Si, выращенными на релаксированных SiGe/Si(001) буферах, возможно управление положением и шириной сигнала люминесценции островков счет выбора толщин слоев Si и, следовательно, изменения положения энергетических уровней электронов в этих слоях. Данный подход позволяет продвинуть сигнал люминесценции от Ge(Si) островков в длинноволновую область, вплоть до 2 мкм, и получить наиболее узкий пик фотолюминесценции для массива неупорядоченных Ge(Si) островков (ширина пика на его полувысоте  $\sim 25$  мэВ при 20К).

6. Температурная зависимость коэффициента сегрегации Sb в кремнии, германии и гетероструктурах на их основе имеет качественно схожий характер и может быть описана моделью, предполагающей наличие двух механизмов сегрегации, связанных с сегрегацией примеси на террасах и ступенях. Смещение температурной зависимости сегрегационных свойств сурьмы в более низкие температуры с ростом доли Ge в SiGe гетероструктурах вызвано уменьшением высоты энергетических барьеров для обоих механизмов сегрегации из-за меньшей энергии связи атомов в германии по сравнению с кремнием.

7. Наличие на температурной зависимости коэффициента сегрегации сурьмы в SiGe гетероструктурах двух диапазонов температур, в каждом из которых возможно получение структур высокого

кристаллического качества, но значение коэффициента сегрегации в которых отличается более чем на 4 порядка, позволяет использовать сегрегацию примеси для селективного легирования этих гетероструктур. Создание резких профилей распределения примеси при этом достигается за счет переключения между режимами кинетически ограниченной сегрегации на ступенях и термодинамически равновесной сегрегации на террасах путем изменения температуры роста. Основанный на данном подходе метод селективного легирования SiGe структур сурьмой позволяет получать как однородно легированные слои толщиной от десятков до сотен нанометров с градиентом распределения примеси на их границах в 2-3 нм на декаду, так и  $\delta$ -легированные слои с шириной 2-3 нм на полувысоте пика распределения примеси.

### **Степень достоверности и апробация работы**

Достоверность результатов обусловлена использованием широкого набора экспериментальных методов, с помощью которых они были получены, и не противоречивостью этих результатов. Диссертация выполнена в Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН) в период с 2002 по 2018 год. Основные результаты диссертации опубликованы в 54 статьях, список которых приведен в конце автореферата. [A1 – A54]. Результаты диссертационной работы обсуждались на семинарах в ИФМ РАН и были представлены на Совещании «Нанофотоника» (Нижний Новгород, 2004 г.), IX-XX Международных симпозиумах "Нанофизика и наноэлектроника" (Нижний Новгород, 2005-2020 гг.), VII, VIII, IX, XI и XII Российских конференциях по физике полупроводников (Ершово, 2005 и 2015 гг; Екатеринбург, 2007 г.; Новосибирск- Томск 2009 г.; Санкт – Петербург, 2013 г.), V, VII, IX и X Международных конференциях по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на их основе (Черноголовка, 2008 г., Нижний Новгород, 2010 г., Санкт-Петербург, 2012 г, Иркутск, 2014 г), 14-th и 18-th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology" (Санкт-Петербург, 2006, 2010г.), Third International Silicon Germanium Technology and device Meeting (ISTDM, Princeton, USA, 2006 г.), 1st International Workshop on Si based nano-electronics and –photonics (Vigo, Spain, 2009), Conference "Quantum Dot 2010" (Nottingham, UK, 2010), 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (Warsawa, Poland, 2013),

XII International Conference on Nanostructured Materials (NANO 2014, Moscow, Russia, 2014), 11th International Conference on Group IV Photonics (Paris, France, 2014) соискателем лично или в рамках докладов соавторов.

### **Основное содержание работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка работ автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы, который включает в себя 307 наименований. Общий объем диссертации составляет 327 страниц, включая 52 рисунка.

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований и представлена ее разработанность, изложены цели и задачи работы, методы исследования, показана научная новизна работы и ее практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, и личный вклад автора.

В начале **первой главы** диссертации представлен обзор литературы, посвященной процессам релаксации упругих напряжений в полупроводниковых гетероструктурах, в котором особое внимание уделено SiGe гетероструктурам. Показано, что понимание процессов пластической релаксации в гетероструктурах позволило за счет формирования релаксированных слоев с низкой концентрацией дефектов кристаллической решетки в значительной мере решить проблему ограниченного набора коммерчески доступных монокристаллических подложек. В этой части диссертации представлено подробное описание процессов релаксации упругих напряжений через развитие шероховатости и диффузионное перемешивание в SiGe гетероструктурах, испытывающих деформацию сжатия. Имеющиеся литературные данные показывают, что для широкого диапазона состава сжатых SiGe слоев релаксация упругих напряжений в них через образование самоформирующихся, бездефектных nanoостровков начинается раньше, чем пластическая релаксация. В литературе достаточно широко представлены результаты исследований роста однослойных и многослойных структур с Ge(Si)/Si(001) островками, которые позволили выявить различия в механизмах смены режима роста с двумерного на островковый в этих структурах в зависимости от состава SiGe слоев; описать эволюцию параметров nanoостровков при увеличении количества осажденного материала и изменении температуры роста; установить особенности роста многослойных структур с Ge(Si) островками и развить

методы их пространственного упорядочения. В то же время, имелось лишь малое число работ, посвященных исследованию процессов релаксации упругих напряжений в растянутых SiGe слоях. Также в литературе практически не исследованным оставался рост островков в структурах, содержащих несколько слоев различного состава, например, рост Ge(Si) островков в структурах с SiGe подслоями. Структуры такого типа могут быть использованы для создания фотоприемников среднего ИК диапазона [25].

Ликвидации части отмеченных пробелов в исследованиях роста напряженных SiGe гетероструктур посвящены разделы **первой главы**, содержащие оригинальные результаты. В них за счет исследования роста напряженных SiGe гетероструктур на различных подложках с кристаллографической ориентацией (001) (Si и Ge монокристаллических подложках, а также на релаксированных SiGe/Si(001) буферах) выявлено влияние знака деформации на процессы релаксации упругих напряжений в них. В **разделе 1.2** описана методика подготовки и роста SiGe структур на различных подложках, приведено краткое описание методов, используемых для их исследований. Также в этом разделе описана методика получения методом газофазной эпитаксии градиентных релаксированных SiGe/Si(001) буферов, которые использовались в качестве подложек для роста SiGe слоев с различным знаком деформации [A8, A9]. В **разделе 1.3** представлены результаты исследований особенностей роста сжатых и растянутых SiGe слоев. Показано, что осаждение сжатых SiGe слоев в широком диапазоне их состава на Si(001) подложки и релаксированные SiGe/Si(001) буферы ведет к постепенному развитию микрошероховатости поверхности и смене механизма роста с двумерного на трехмерный с формированием массива бездефектных Ge(Si)

наноостровков [A50] (рис. 1a). В то же время, при осаждении растянутых SiGe слоев на Ge(001) подложки и релаксированные SiGe/Si(001) буферы поверхность роста остается атомарно гладкой (рис. 1b) до

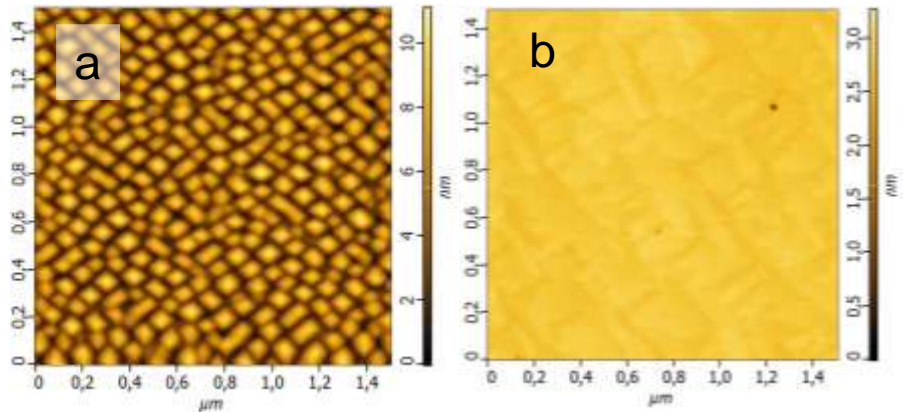
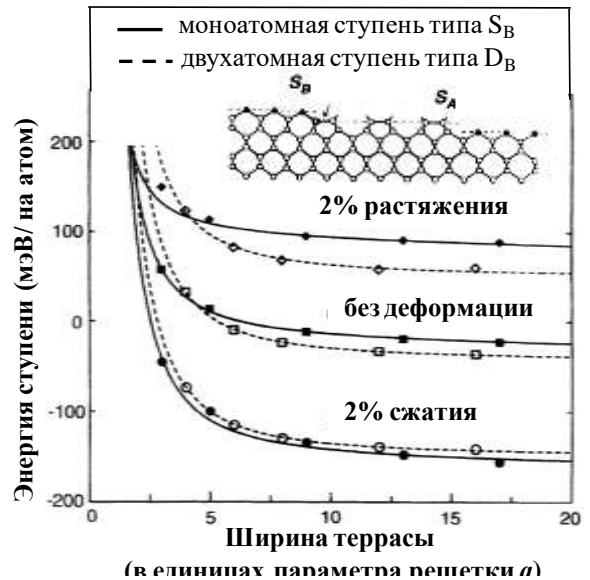


Рис. 1. АСМ снимки сжатого слоя  $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}/\text{Si}(001)$  толщиной 3.5 нм (a) и растянутого слоя  $\text{Si}_{0.35}\text{Ge}_{0.65}/\text{Ge}(001)$  толщиной 8 нм (b).

начала пластической релаксации упругих напряжения в них за счет образования дислокаций [A50]. Выявленное влияние знака деформации на развитие шероховатости поверхности напряженных SiGe слоев связывается с зависимостью от знака деформации энергии моноатомных ступеней на поверхности кристаллов со структурой алмаза (001) с поверхностной реконструкцией атомов (2x1) [13] (рис. 2). Уменьшение энергии моноатомных ступеней при приложении к ним деформации сжатия способствует образованию Ge(Si) самоформирующихся наностроек в широком диапазоне составов и условий роста сжатых SiGe слоев (см. обзоры [7-9]). Увеличение же этой энергии при деформации растяжения ведет к малой шероховатости поверхности растянутых SiGe слоев и является одной из причин формирования при их росте массивов дефектных, а не когерентных наностроек [26].



Также в разделе 1.3 показано, что кроме шероховатости поверхности при росте на релаксированных SiGe/Si(001) буферах заметное влияние на критическую толщину двумерного роста ( $h_{2D}$ ) SiGe слоев оказывает сегрегация Ge [A36]. Влиянием этих факторов объясняется экспериментально установленное уменьшение величины  $h_{2D}$  сжатых  $Si_{1-x}Ge_x$  слоев на релаксированных  $Si_{1-y}Ge_y/Si(001)$  буферах (где  $x > y$ ) по сравнению с их ростом на Si(001) при одинаковых значениях рассогласования кристаллических решеток пленки и подложки [A36, A42].

В разделах 1.4 и 1.5 диссертации продемонстрировано, что изменение шероховатости поверхности роста и сегрегация Ge в результате осаждения напряженных SiGe слоев могут быть использованы для управления последующим ростом напряженных структур. В случае роста на Si(001) подложках, рассмотренном в разделе 1.4, предосаждение планарных, сжатых SiGe подслоев (далее – cSiGe подслоев) ведет к уменьшению  $h_{2D}$  на них

сжатых SiGe слоев с высокой долей Ge [A12, A25, A26, A27] (рис. 3а). Величина этого уменьшения существенно возрастает с ростом упругой энергии, накопленной в подслое, то есть с ростом доли Ge в подслое или его толщины (рис. 3а). Зависимость критической толщины двумерного роста SiGe слоя от толщины подслоя имеет нелинейный характер: основное изменение  $h_{2D}$  наблюдается с ростом толщины подслоя до 3–4 нм (рис. 3а) [A25-A27]. Влияние сжатых SiGe подслоев на дальнейший рост структуры сохраняется при наращивании их ненапряженным Si слоем толщиной в 3–4 нм [A25]. Уменьшение критической толщины двумерного роста SiGe слоев с высокой долей Ge на SiGe/Si(001) сжатых планарных подслоях связывается с увеличением микрошероховатости поверхности роста и накоплением на поверхности атомов Ge в результате их сегрегации при осаждении подслоя [A12, A25, A26, A27]. В случае формирования на Si(001) короткопериодных Si/Ge решеток, одним из следствий влияния этих факторов является существенное уменьшение  $h_{2D}$  пленки Ge с ростом числа периодов решетки или уменьшением толщины Si слоев до значений  $\leq 3$  монослоев (МС, 1МС~0.14 нм) [A50]. Полученные экспериментальные результаты по влиянию cSiGe подслоев на дальнейший рост структур хорошо количественно описываются моделью энергетического баланса, в которой при расчете накопленной в структуре упругой энергии учитывается неоднородное распределение состава осажденных слоев вследствие сегрегации атомов Ge [27] и экспоненциально спадающий вклад этих слоев в упругую энергию при увеличении глубины их залегания относительно поверхности роста [A25-A27]. При этом подгоночный параметр, который определяет максимальную глубину залегания cSiGe слоя, при которой он продолжает оказывать влияние на дальнейший рост структуры (параметр  $L_{dec}$  на рис. 3а) для используемых условий роста составляет  $L_{dec}=3.5$  нм [A25]. Также в **разделе 1.4** обсуждается влияние cSiGe подслоев на размеры, форму, состав и поверхностную плотность Ge(Si) наностроек [A10, A11, A28], их пространственное самоупорядочение [A37] и фотолюминесценцию [A12, A13].

В **разделе 1.5** показано, что уменьшение шероховатости поверхности и количества сегрегированного Ge в результате осаждения на релаксированные  $Si_{1-y}Ge_y/Si(001)$  буферы растянутых  $Si_{1-x}Ge_x$  подслоев ( $x < y$ ) (далее tSiGe или tSi подслои) ведет к значительному росту критической толщины двумерного роста Ge на них (рис. 3b) [A36, A42]. Как и в случае сжатых SiGe подслоев на



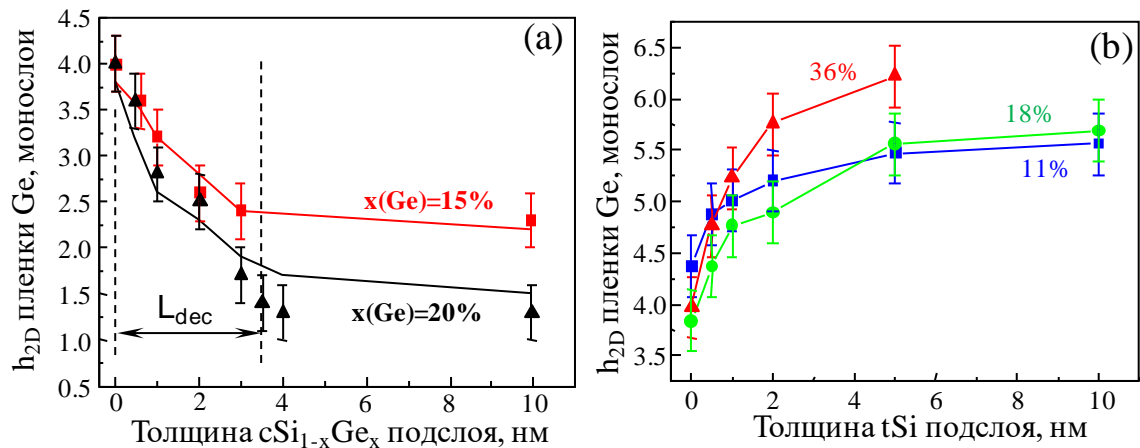


Рис. 3. а) – экспериментальные (символы) и рассчитанные по модели энергетического баланса из работы [A26] (линии) зависимости  $h_{2D}$  пленки Ge на  $cSi_{1-x}Ge_x$  подслоях различного состава от их толщины. Стрелками показан подгоночный параметр  $L_{dec}=3.5$  нм. б) - зависимость  $h_{2D}$  роста пленки Ge на  $tSi$  подслое от его толщины для  $Si_{1-y}Ge_y/Si(001)$  буферов с долей Ge  $y=11\%$ ,  $18\%$  и  $36\%$ . Линии проведены на глаз для наглядности.

$Si(001)$  подложках, при использовании релаксированных  $SiGe/Si(001)$  буферов влияние растянутых  $SiGe$  подслоев на дальнейший рост структуры становится более выраженным с ростом величины их деформации и/или толщины. При толщине  $tSi$  подслоя больше 1 нм величина  $h_{2D}$  роста Ge на  $SiGe/Si(001)$  релаксированных буферах становится больше  $h_{2D}$  роста Ge на  $Si(001)$  (рис. 3b). Влияние растянутых  $SiGe$  подслоев на критическую толщину двумерного роста Ge, как и в случае сжатых  $SiGe$  подслоев, сохраняется и при их заращивании тонким ненапряженным слоем A36, A42].

Анализ имеющихся литературных данных указывает на то, что аналогичное установленному в диссертации для гетеропары  $SiGe$  влиянию напряженных подслоев на последующий рост структур имеет место и для гетеропары  $InAs/GaAs$ .

В разделе 2.1 второй главы представлены результаты исследований, направленных на установление связи между люминесцентными свойствами одно и многослойных структур с Ge(Si) наноструктурами, выращенных на  $Si(001)$ , с их параметрами. В подразделе 2.1.1 за счет исследования Ge(Si)/ $Si(001)$  наноструктур различными методами (атомно-силовой микроскопии, рентгенодифракционным анализом, комбинационным рассеянием света) в широком диапазоне температур осаждения Ge ( $T=460^{\circ}\div 700^{\circ}C$ ) была определена зависимость параметров (размеров, формы, поверхностной плотности и состава) островков от температуры роста [A1 – A7]. Показано, что при температурах  $T \geq 600^{\circ}C$  основным типом островков на

поверхности являются куполообразные (dome) наноостровки, имеющие до зарацивания их кремнием высоту более 10 нм, а размеры в плоскости роста - >50 нм. При низких же температурах роста ( $T \leq 550^\circ\text{C}$ ) на поверхности доминируют так называемые hut-кластеры – островки, имеющие прямоугольное основание и плоскости типа  $\{105\}$  в качестве боковых граней. Размеры hut-кластеров значительно меньше, чем dome-островков. Согласно полученным зависимостям, с понижением температуры роста наблюдается существенный рост среднего содержания Ge в островках: с ~ 50% для незарощенных dome-островков, полученных при  $T=700^\circ\text{C}$ , до ~100% для hut-кластеров, полученных при низких температурах роста. На зависимости средней высоты островков от температуры роста наблюдается резкое (с 10–12 нм до 2 нм) ее уменьшение при понижении температуры роста с  $T=600^\circ\text{C}$  до  $550^\circ\text{C}$ , которое связывается со сменой типа островков, доминирующих на поверхности, с dome на hut, наблюдающаяся в этом диапазоне температур. При зарацивании островков покровным слоем кремния происходит уменьшение высоты островков, рост их латеральных размеров и доли Si в них.

Сравнительные исследования зависимости от температуры роста параметров Ge(Si)/Si(001) наноостровков и их спектров фотолюминесценции (ФЛ), представленные в **подразделе 2.1.2**, позволили установить связь между спектральным положением сигнала люминесценции островков и их параметрами [A1 – A7]. Эта связь для широкого исследованного диапазона температур роста  $T=460^\circ\text{C}-700^\circ\text{C}$  может быть объяснена в рамках модели непрямого в реальном пространстве оптического перехода с участием дырок, локализованных в Ge(Si) островках, и электронов, находящихся в потенциальных ямах в локально растянутых областях в Si на гетерогранице с островком (рис. 4а) [21, 22]. Показано, что для Ge(Si) dome-островков, являющихся основным типом островков на поверхности структур, выращенных при  $T \geq 600^\circ\text{C}$ , положение линии ФЛ зависит в основном от состава островков. Уменьшение доли Si в dome-островках при понижении температуры роста приводит к уменьшению энергии непрямого оптического перехода за счет увеличения глубины потенциальной ямы для дырок в островках, и, как следствие, сдвигу их сигнала ФЛ в область меньших энергий (рис. 4). Положение сигнала ФЛ dome-островков хорошо совпадает с энергией непрямого оптического перехода (рис. 4а), рассчитанной с учетом экспериментально определенных параметров островков (размера, среднего

состава, степени релаксации упругих напряжений). Сдвиг сигнала ФЛ от островков в область больших энергий при понижении температуры роста с  $600^{\circ}\text{C}$  до  $550^{\circ}\text{C}$  вызван сменой типа островков, доминирующих на поверхности (с dome на hut), в результате которого средняя высота островков уменьшается примерно в 5 раз. Малая высота hut-кластеров ведет к

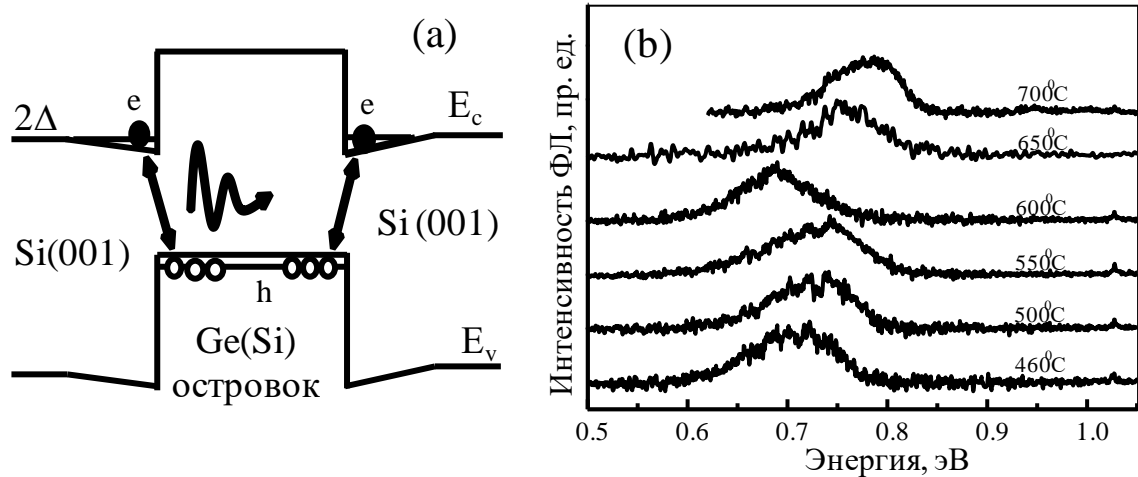


Рис. 4. а) - схематическое изображение зонной диаграммы Ge(Si)/Si(001) островков. Стрелками показаны не прямые в реальном пространстве оптические переходы. б) - спектры ФЛ однослойных структур с Ge(Si)/Si(001) островками, выращенными при различных температурах, измеренные при 4К InSb детектором. Т роста структур указана рядом с соответствующим спектром.

выталкиванию уровней размерного квантования дырок в их валентной зоне к потолку валентной зоны Si матрицы, что и является причиной увеличения энергии непрямого оптического перехода (рис. 4). На положение сигнала ФЛ hut-кластеров, являющихся основным типом островков при низких ( $T \leq 550^{\circ}\text{C}$ ) температурах, оказывает влияние не только их состав, но и малый размер hut-кластеров в направлении роста. Увеличение доли Ge и меньшее изменение параметров (высоты и состава) hut-кластеров при их зародивании с понижением температуры роста является причиной сдвига максимума их сигнала ФЛ в область меньших энергий при уменьшении температуры роста (рис. 4).

В подразделе 2.1.3 рассмотрены особенности люминесценции многослойных структур с Ge(Si)/Si(001) островками. На положение их сигнала ФЛ влияет два основных фактора [A1 - A5]: рост глубины потенциальной ямы для электронов в Si слоях, разделяющих соседние слои с островками, ведущий к уменьшению энергии непрямого оптического перехода, и увеличение доли Si в островках, которое ведет к росту энергии непрямого перехода. Оба этих фактора связаны с ростом упругих

напряжений в многослойных структурах с Ge(Si) островками. Экспериментально выявленное смещение сигнала ФЛ от многослойных структур в сторону больших энергий по сравнению с однослойными показывает, что основным фактором, оказывающим влияние на положение сигнала люминесценции, является уменьшение доли Ge в островках в многослойных структурах по сравнению с однослойными. Установленная связь между параметрами островков и их излучательными свойствами позволила определить условия роста Ge(Si)/Si(001) островков, необходимые для наблюдения при комнатной температуре сигнала люминесценции от островков в области длин волн 1.3-1.8 мкм. Показано, что наиболее интенсивный сигнал люминесценции при комнатной температуре наблюдается от многослойных структур с dome островками, выращенными при 600<sup>0</sup>С - минимальной температуре, при которой они являются основным типом островков на поверхности. Это связывается с реализацией в таких структурах наиболее глубоких потенциальных ям для носителей заряда в островке и его окрестностях. Глубокая потенциальная яма для дырок в dome островках, выращенных при 600<sup>0</sup>С, обеспечивается наибольшей, для dome островков, долей Ge в них и слабым влиянием квантоворазмерных эффектов на положение энергетических уровней дырок в dome островках. Локализация электронов вблизи островков реализуется за счет напряжений растяжения Si слоев, разделяющих слои с островками. Пространственная локализация носителей заряда в островках и их окрестностях уменьшает вероятность их безызлучательной рекомбинации на дефектах структуры, тем самым увеличивая интенсивность сигнала люминесценции, связанного с Ge(Si) островками. Одним из подтверждений этого является продемонстрированная меньшая чувствительность излучательных свойств структур с Ge(Si) островками к радиационному воздействию по сравнению с излучательными свойствами объемного Si и SiGe гетероструктур с квантовыми ямами [A29, A31]. Продемонстрировано, что низкая чувствительность излучательных свойств структур с Ge(Si) островками позволяет использовать их в различных микрорезонаторах [A51, A53, A54].

В разделе 2.2 диссертации приведены результаты исследований влияния на электролюминесценцию Ge(Si) островков в многослойных структурах температуры их роста, количества осажденного Ge, числа слоев с островками и толщины Si слоев, их разделяющих. Эти исследования были направлены на получение на Si(001) подложках светодиодов с Ge(Si) наноструктурами, излучающими в области 1.3–1.8 мкм [A21 – A24, A30, A38]. В

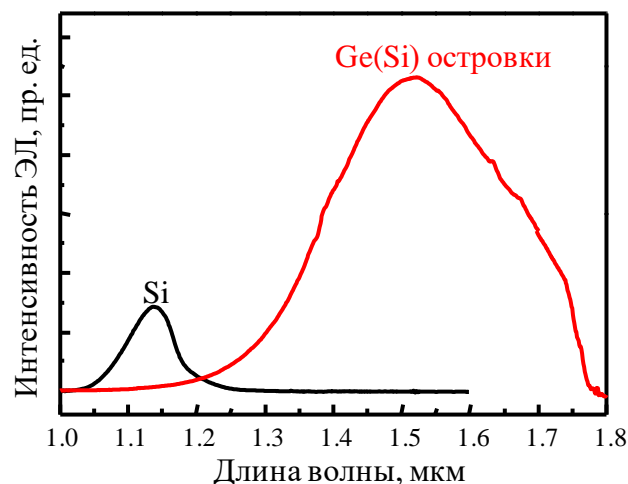


Рис. 5. Измеренные при комнатной температуре спектры электролюминесценции тестового Si диода и диода с Ge(Si) островками, выращенного при 600<sup>0</sup>С.

результате проведенной оптимизации условий роста были получены макеты светодиодов с Ge(Si)/Si(001) островками, внешняя квантовая эффективность которых при комнатной температуре составляет ~0.01% (рис. 5). В разделе 2.4 продемонстрировано, что полученные светодиоды могут быть использованы для реализации оптической связи между структурами, сформированными на кремнии.

**Третья глава** диссертации посвящена исследованиям люминесцентных свойств нового класса SiGe гетероструктур: структур с Ge(Si) самоформирующимися наноструктурами, выращенными на релаксированных SiGe/Si(001) буферах и встроенных между тонкими слоями растянутого Si (далее – Ge(Si)/tSi островки). Для этого класса SiGe гетероструктур возможна эффективная пространственная локализация не только дырок в островках, но и электронов в растянутых tSi слоях, расположенных над и под островками (рис. 6).

В разделе 3.1 приведены результаты исследований влияния температуры роста на параметры Ge(Si)/tSi островков [A10, A14], а в подразделе 3.2.1 – на их спектры фотолуминесценции. Показано, что при фиксированной толщине tSi слоев над и под островком положение и ширина сигнала ФЛ Ge(Si)/tSi островков определяются в первую очередь теми же основными факторами, что и сигнал ФЛ Ge(Si)/Si(001) островков: составом и размером островков [A17, A18, A20]. Как и в случае Ge(Si)/Si(001) островков, смещение сигнала ФЛ Ge(Si)/tSi dome островков в область меньших энергий

при понижении температуры роста обусловлено ростом доли Ge в островках. При смене типа островков, доминирующих на поверхности, с dome на hut, который для Ge(Si)/tSi островков происходит при понижении температуры роста с 630<sup>0</sup>С до 600<sup>0</sup>С, наблюдается смещение пика ФЛ Ge(Si)/tSi островков в сторону больших энергий. Это смещение связывается с малой высотой hut кластеров по сравнению с dome островками, что приводит к выталкиванию уровней размерного квантования дырок в островках к потолку валентной зоны матрицы, и, как следствие, росту энергии непрямого оптического перехода (рис. 6).

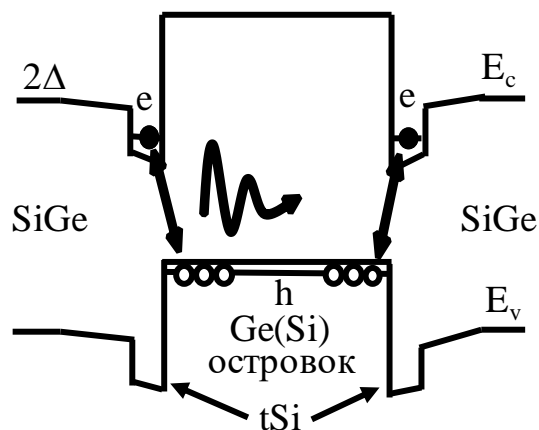


Рис. 6. Схематическое изображение зонной диаграммы Ge(Si)/tSi(001) островков. Стрелками показаны непрямоугольные в реальном пространстве оптические переходы с участием электронов из tSi слоев над и под островком.

В разделе 3.2 показано, что эффективная пространственная локализация электронов в тонких, растянутых слоях Si на гетерогранице с островком (рис. 6) приводит к росту вероятности их излучательной рекомбинации с дырками из островка без участия фононов. В результате этого в сигнале люминесценции Ge(Si)/tSi островков отсутствуют пики, связанные с оптическими переходами с участием фононов [A15, A19] (рис. 7а). Продемонстрированы возможности управления спектральным положением (в подразделе 3.2.2) и шириной сигнала (в подразделе 3.2.3) люминесценции Ge(Si)/tSi островков (рис. 7), за счет изменения положения энергетических уровней электронов в tSi слоях над и под островками (рис. 6) при изменении толщины этих слоев [A15, A16, A19, A32, A33]. В частности, за счет увеличения толщины растянутых Si слоев сигнал люминесценции Ge(Si) островков может быть смещен в длинноволновую область, вплоть до 2 мкм (рис. 7). Также, изменение толщин растянутых Si слоев над и под островками позволяет контролируемым образом менять ширину их линии ФЛ за счет изменения энергии оптических переходов, связанных с участием электронов из этих слоев (рис. 7b). Доминирование в сигнале люминесценции Ge(Si) островков, встроенных между слоями растянутого Si, пика, связанного с бесфононным оптическим переходом, и осаждение более толстого tSi слоя

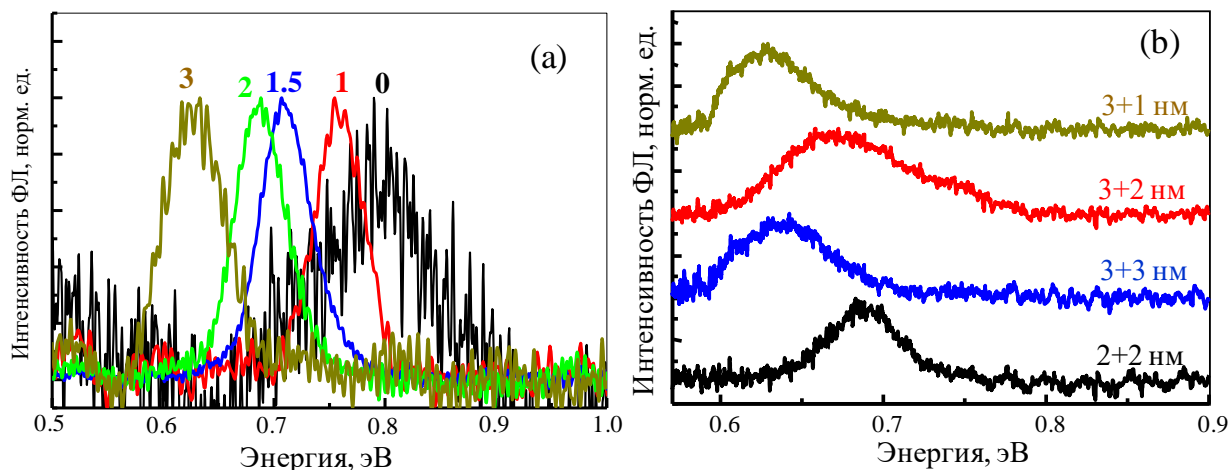


Рис. 7. Нормированные спектры ФЛ структур с Ge(Si)/tSi островками, выращенными при 650<sup>0</sup>C и заключенными между слоями tSi различной толщины. Толщина tSi слоев над и под островками указана рядом с соответствующим спектром. Спектры измерены при 77K.

над островками для компенсации большего диффузионного размытия покровного tSi слоя позволили получить структуры с Ge(Si)/tSi островками, имеющие рекордно узкую для массива неупорядоченных Ge(Si) островков линию ФЛ (20-30 мэВ при температуре 20 К) [A32, A33], ширина которой сравнима с характерной шириной линии ФЛ от массива прямозонных квантовых точек InAs/GaAs.

С ростом вероятности оптического перехода без участия фонона связывается значительно более высокая интенсивность сигнала люминесценции при низких температурах от Ge(Si)/tSi островков по сравнению с Ge(Si)/Si(001) островками, которое показано в **разделе 3.3** [A15, A29]. Выявленное в этом же разделе сильное температурное гашение сигнала люминесценции Ge(Si) островков, выращенных на релаксированных SiGe/Si(001) буферах и на структурах «напряженный кремний на изоляторе», связывается с более высокой дефектностью этих подложек по сравнению с Si монокристаллическими подложками [A45, A46]. Несмотря на сильное температурное гашение сигнал электролюминесценции в области длин волн 1.6-2.0 мкм от Ge(Si) островков, встроенных между слоями растянутого Si, впервые наблюдался вплоть до комнатной температуры [A52]. Результаты по формированию и исследованию электролюминесценции диодных структур с Ge(Si)/tSi островками приведены в **разделе 3.4** диссертации.

**Четвертая глава** посвящена исследованию сегрегации Sb в SiGe гетероструктурах и развитию с использованием результатов этих исследований метода селективного легирования SiGe эпитаксиальных

структур сегрегирующими примесями. В разделе 4.1 представлен обзор литературы, посвященной проблеме легирования этих структур, который показал, что каждый из предложенных ранее подходов к решению проблемы сегрегации доноров в SiGe гетероструктурах имел то или иное ограничение в своем применении. Кроме этого, практически не были исследованы сегрегационные свойства доноров в SiGe эпитаксиальных структурах. Имеющиеся литературные данные и полученные экспериментальные результаты демонстрируют, что температурная зависимость коэффициента сегрегации ( $r$ ) Sb в Si(001) гомоэпитаксиальных структурах может быть хорошо описаны моделью, в которой учитываются механизмы сегрегации примеси как на террасах, так и на атомных ступенях [28], [A34] (рис. 8). На основе анализа этой зависимости был предложен оригинальный метод селективного легирования SiGe гетероструктур сегрегирующими примесями [A34, A35], описание которого приведено в разделе 4.2. Метод основан на наличии на температурной зависимости коэффициента сегрегации сурьмы двух диапазонов температур, в каждом из которых возможно получение структур высокого кристаллического качества, но значение коэффициента сегрегации в которых отличается более чем на 4 порядка (рис. 8). В предложенном методе для создания легированных слоев, в том числе,  $\delta$ -легированных, используется предосаждение определенного количества примеси и рост легированных слоев в более низкотемпературном из этих диапазонов, в котором значение коэффициента сегрегации Sb  $r \sim 100$  (рис. 8). Для резкого уменьшения объемной концентрации примеси рост структуры прерывается для увеличения температуры роста до температуры, при которой наблюдается максимум на температурной зависимости коэффициента сегрегации примеси с  $r > 10^6$  (рис. 8). Рост

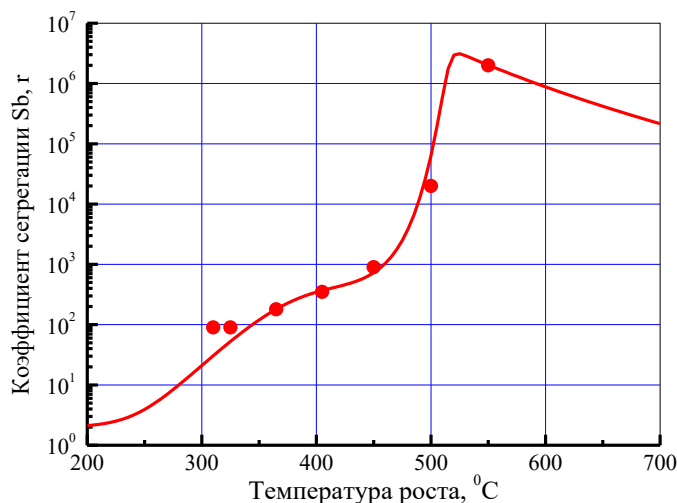


Рис. 8. Температурная зависимость коэффициента сегрегации Sb в Si(001) гомоэпитаксиальных структурах. Символы — экспериментальные данные, кривая — их описание моделью из работы [28], в которой учтены два механизма сегрегации.



нелегированных слоев происходит при этой высокой температуре, при которой из-за высокого значения коэффициента сегрегации примеси не происходит ее встраивание в растущую структуру.

Необходимым условием для реализации предложенного метода являлось точное определение температурной зависимости коэффициента сегрегации Sb в SiGe эпитаксиальных структурах. Экспериментальному определению этих зависимостей в Si(001) и Ge(001) гомоэпитаксиальных структурах, а также в SiGe гетероструктурах посвящен **раздел 4.3** диссертации. Полученные в этом разделе результаты позволили впервые в широком диапазоне температур роста экспериментально определить зависимость коэффициента сегрегации Sb в Ge от температуры роста [A48, A49]. Показано, что, как и для Si(001) гомоэпитаксиальных структур, полученные экспериментальные зависимости  $r(T)$  для сегрегации Sb в различных SiGe структурах могут быть хорошо описаны моделью из работы [28], в которой учитываются механизмы сегрегации примеси как на террасах, так и на атомных ступенях [A34, A43, A44, A49]. Смещение этих зависимостей в область меньших температур роста с увеличением доли Ge в SiGe структурах по сравнению с аналогичной зависимостью для сегрегации Sb в Si связывается с меньшими значениями энергий, характеризующих различные механизмы сегрегации, в Ge по сравнению с Si. Это обусловлено меньшей энергией связи атомов Ge по сравнению с атомами Si. Выявлено более существенное влияние состава SiGe слоев на сегрегацию сурьмы в них по сравнению с влиянием знака и величины деформации [A43, A44].

Согласно полученным экспериментальным данным на температурных зависимостях коэффициента сегрегации Sb в структурах на основе кремния и германия наблюдается участок, в котором при изменении температуры роста всего на 150<sup>0</sup>-250<sup>0</sup>С коэффициент сегрегации примеси меняется более чем на 4 порядка величины (рис. 8). Это позволяет использовать предложенный метод селективного легирования, описанный в **разделе 4.2**, для формирования селективно легированных SiGe структур. Описание результатов практической реализации этого метода представлено в **разделе 4.4** диссертации. Показано, что предложенный метод позволяет получать в SiGe структурах как однородно легированные слои толщиной в десятки и сотни нанометров, распределение Sb на границах которых характеризуется градиентом распределения примеси в 2-3 нм на декаду (рис. 9а), так и  $\delta$ -легированные слои, ширина которых на полувысоте пика

распределения Sb, полученного методом ВИМС, составляет 2-3 нм [А34, А39, А40, А44, А47, А49] (рис. 9b),. Данные значения соответствуют лучшим значениям, приведенным в литературе для структур на основе кремния [1] и германия [29], легированных донорами. Из-за того, что в предложенном методе для формирования легированных слоев, в отличие от многих ранее предложенных методов селективного легирования [1], не используются низкие температуры роста, выращенные легированные структуры имеют

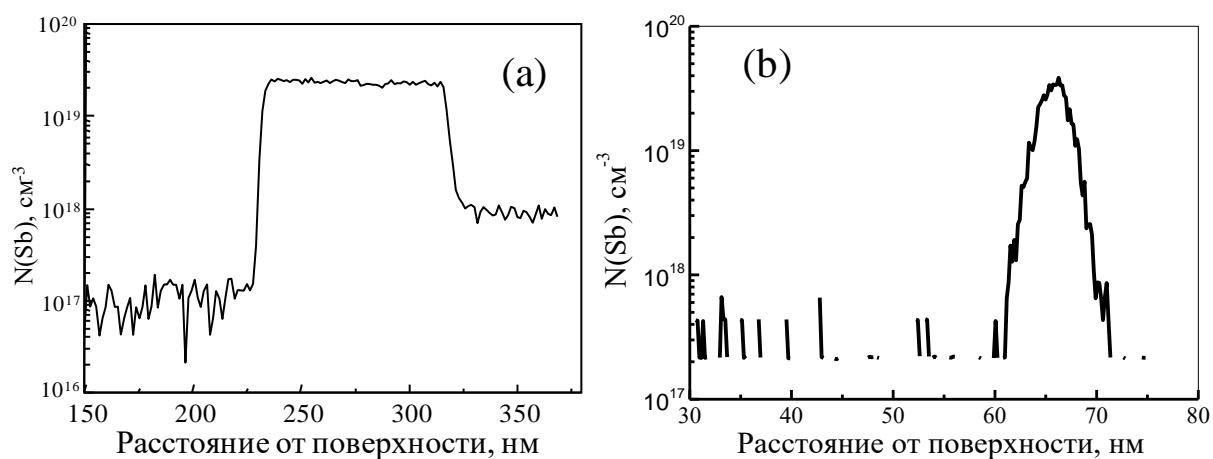


Рис. 9. Распределение Sb, полученное с помощью ВИМС, в Si структуре со скрытым  $n^+$  слоем с резким нарастанием и спадом объемной концентрации Sb (a) и в Ge структуре с  $\delta$ -легированным слоем (b). Минимальная концентрация Sb в структурах на уровне  $(1\div 3)\times 10^{17}$   $\text{см}^{-3}$  определяется чувствительностью используемого ВИМС оборудования.

высокое кристаллическое качество. В полученных Si:Sb и Ge:Sb структурах с  $\delta$ -легированными слоями наблюдается эффект слабой локализации электронов при их низкотемпературном магнитотранспорте, характеристики которого отвечают двумерному транспорту электронов.

В подразделе 4.4.3 экспериментально показано, что развитый метод селективного легирования кремния может быть использован как для создания омических контактов к кремнию, так и для получения низкобарьерных диодов Шоттки [А41]. Продемонстрировано, что для уменьшения высоты барьера можно использовать как однородно легированный, тонкий приповерхностный  $n^{++}$ -Si слой, так и  $\delta$ -легированный  $n^+$ -Si слой, сформированный вблизи поверхности.

Достоинствами предложенного метода легирования SiGe структур являются его простота и возможность его реализации в установках молекулярно-пучковой эпитаксии стандартной комплектации. Полагается, что предложенный метод селективного легирования может быть использован

и для других примесей и полупроводниковых систем при наличии на температурной зависимости сегрегационных свойств примеси участка с резкой зависимостью коэффициента сегрегации примеси от температуры.

**В Заключение** сформулированы основные результаты диссертации:

1. Выполнены исследования роста SiGe структур на различных подложках (Si(001) и Ge(001) монокристаллических подложках, а также на релаксированных SiGe/Si(001) буферах), которые позволили экспериментально установить влияние знака деформации на процессы релаксации упругих напряжений в них. Показано, что при росте растянутых  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоев на Ge(001) подложках и релаксированных  $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y/\text{Si}(001)$  ( $x < y$ ) буферах, в отличие от роста сжатых  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоев, поверхность роста остается атомарно гладкой вплоть до начала пластической релаксации упругих напряжений в них, которая сопровождается образованием дефектных островков.

2. Выявленные различия в развитии шероховатости поверхности роста сжатых и растянутых  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоев обусловлены зависимостью энергии моноатомных ступеней на поверхности (001) с реконструкцией атомов ( $2 \times 1$ ) от знака деформации. Уменьшение энергии моноатомных ступеней при деформации сжатия ведет к развитию шероховатости поверхности при росте сжатых  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоев, что облегчает преодоление энергетических барьеров, связанных со сменой механизма их роста с двумерного на трехмерный. Это является одной из причин образования бездефектных самоформирующихся nanoостровков в широком диапазоне условий роста и состава таких слоев. Рост энергии моноатомных ступеней при приложении деформации растяжения препятствует развитию шероховатости поверхности роста растянутых  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоев и образованию бездефектных островков.

3. Выявлено уменьшение критической толщины двумерного роста пленки Ge на релаксированных SiGe/Si(001) буфера в сравнении с ростом Ge на Si(001), которое наблюдается несмотря на уменьшение рассогласования параметров кристаллических решеток пленки и подложки и связывается с более высокой шероховатостью поверхности SiGe/Si(001) буферов и сегрегацией атомов Ge при росте на них.

4. Экспериментально продемонстрировано, что предосаждение сжатых  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоев ведет к уменьшению критической толщины двумерного роста пленки Ge на них, а растянутых – к ее увеличению. Величина изменения критической толщины двумерного роста Ge зависит от знака и величины

деформации напряженных SiGe слоев, расположенных вблизи поверхности роста. Влияние напряженных подслоев на рост пленки Ge сохраняется и при их заращивании тонкими, толщиной до 3–4 нм, ненапряженными слоями. Выявленное влияние напряженных подслоев на рост SiGe гетероструктур связывается с изменением шероховатости поверхности и количества германия, сегрегированного на поверхности роста в результате их осаждения. В случае роста на Si(001) решеток Ge/Si с толщиной Si слоев меньше 4 нм эти факторы приводят к уменьшению критической толщины двумерного роста Ge в верхних слоях решетки до значений меньше 3 монослоев, считающейся термодинамически равновесной толщиной двумерного роста Ge на Si(001).

5. Исследована зависимость параметров Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков (размеров, состава, формы, поверхностной плотности) и их спектров фотолюминесценции от температуры роста. Показано, что основной причиной смещения сигнала люминесценции Ge(Si) островков в область меньших энергий при понижении температуры роста с 700<sup>0</sup>С до 600<sup>0</sup>С является увеличение доли Ge в куполообразных наноструктурах. Смещение пика люминесценции Ge(Si) островков в область больших энергий при понижении температуры роста с 600<sup>0</sup>С до 550<sup>0</sup>С наблюдается при смене типа островков, доминирующих на поверхности, с dome наноструктур на hut-кластеры, сопровождающейся резким уменьшением средней высоты островков. Показано, что при использовании в расчетах зонной диаграммы Ge(Si) островков экспериментально определенных значений их состава, упругих напряжений и размеров спектральное положение сигнала люминесценции Ge(Si) островков может быть хорошо количественно описано моделью непрямого в реальном пространстве оптического перехода между дырками, локализованными в Ge(Si) островках, и электронами, находящимися в локально растянутых областях кремния на гетерогранице с островком.

6. Установлено, что интенсивность сигнала люминесценции куполообразных островков при комнатной температуре увеличивается с ростом доли Ge в них, которое происходит при понижении температуры роста. При смене доминирующего типа островков на поверхности с dome наноструктур на hut-кластеры интенсивность сигнала люминесценции Ge(Si) островков при комнатной температуре падает.

7. На основе многослойных структур с Ge(Si)/Si(001) островками получены макеты светодиодов, излучающие в области длин волн 1.3-1.8 мкм с внешней квантовой эффективностью при комнатной температуре ~0.01%. Продемонстрирована возможность использования полученных светодиодов для реализации оптической связи между структурами, сформированными на кремнии.

8. Впервые продемонстрирована возможность управления люминесцентными свойствами Ge(Si) островков (вероятностью оптического перехода без участия фонона, спектральным положением и шириной сигнала люминесценции) за счет их встраивания между слоями растянутого Si при росте на релаксированных SiGe/Si(001) буферах или подложках «напряженный кремний на изоляторе». Данный подход позволяет менять энергию непрямого оптического перехода в островках за счет изменения положения энергетических уровней электронов в глубоких потенциальных ямах в растянутых слоях кремния над и под островками при изменении их толщины. Для Ge(Si) островков, выращенных при 630<sup>0</sup>–650<sup>0</sup>С, увеличение толщины растянутых Si слоев над и под островками до 3 нм сдвигает сигнал люминесценции Ge(Si) островков в длинноволновую область вплоть до 2 мкм, что является наиболее длинноволновым сигналом для эпитаксиальных SiGe гетероструктур.

9. Показано, что сигнал люминесценции Ge(Si) островков, выращенных на релаксированных SiGe/Si(001) буферах и встроенных между слоями растянутого Si, обусловлен излучательными переходами с участием электронов, локализованных в Si слоях как над, так и под островками. Возможность независимого изменения энергии этих переходов за счет изменения толщин растянутых Si слоев позволяет управлять шириной линии люминесценции островков. Таким путем достигнута рекордно узкая для неупорядоченных Ge(Si) островков ширина линии люминесценции в 20-30 мЭВ при температуре 20 К.

10. Сигнал люминесценции Ge(Si) островков, встроенными между слоями растянутого Si, обусловлен оптическими переходами без участия фононов.

11. Впервые в широком диапазоне температур роста экспериментально определена температурная зависимость коэффициента сегрегации Sb в Ge(001) гомоэпитаксиальных структурах. Данная зависимость имеет качественно схожий характер с температурной зависимостью коэффициента сегрегации Sb в Si(001) гомоэпитаксиальных структурах, но смещена

относительно нее на  $150^0\text{--}200^0\text{C}$  в область более низких температур. Это смещение обусловлено меньшими значениями энергий, характеризующих различные механизмы сегрегации, в Ge по сравнению с Si.

12. С использованием экспериментально определенных температурных зависимостей сегрегационных свойств Sb в SiGe гетероструктурах методом МПЭ получены селективно легированные сурьмой SiGe гетероструктуры с градиентом распределения примеси на границах легированных слоев в 2–3 нм декаду и шириной  $\delta$ -легированных слоев в 2–3 нм. Показано, что выращенные легированные слои обладают высоким кристаллическим качеством.

### **Список публикаций автора по теме диссертации**

- A1. Microscopic and optical investigation of Ge nanoislands on silicon substrates / Z.F.Krasil'nik, P.Lytvyn, D.N.Lobanov, N.Mesters, A.V.Novikov, J.Pascual, M.Ya.Valakh, V.U.Yukhymchuk // Nanotechnology – 2002. – V.13. – P. 81-85.
- A2. Низкоэнергетическая фотолюминесценция структур с GeSi/Si(001) самоорганизующимися наноструктурами / Н.В.Востоков, Ю.Н.Дроздов, З.Ф.Красильник, Д.Н.Лобанов, А.В.Новиков, А.Н.Яблонский // Письма в ЖЭТФ – 2002. – Т. 76. – С. 425-429.
- A3. Сокращенный способ рентгеновского дифракционного сканирования обратного пространства частично релаксированных слоев и островков / Ю.Н.Дроздов, В.М.Данильцев, З.Ф.Красильник, Л.Д.Молдавская, А.В.Новиков, О.И.Хрыкин, В.И.Шашкин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования – 2003. – № 5. – С. 22-26.
- A4. Photoluminescence of Ge(Si)/Si(001) self-assembled islands in the near infra-red wavelength range / A.V.Novikov, D.N.Lobanov, A.N.Yablonsky, Yu.N.Drozdo, N.V.Vostokov, Z.F.Krasilnik // Physica E – 2003. – V. 16/3-4. – P. 467 – 472.
- A5. Фотолюминесценция структур с GeSi/Si(001) самоорганизующимися наноструктурами/ Н.В.Востоков, Ю.Н.Дроздов, З.Ф.Красильник, Д.Н.Лобанов, А.В.Новиков, А.Н.Яблонский// Известия Академии наук. Серия физическая – 2003. - № 2. - С. 159-162.
- A6. Фотолюминесценция GeSi/Si(001) самоорганизующихся наноструктур различной формы / Н.В. Востоков, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, А.Н. Яблонский // Физика твердого тела – 2004 – Т.46. – С. 63-66.

- A7. Photoluminescence of GeSi/Si(001) self-assembled islands with dome and hut shape / A.V. Novikov, M.V. Shaleev, D.N. Lobanov, A.N. Yablonsky, N.V. Vostokov, Z.F. Krasilnik // *Physica E* – 2004. – V. 23. – P. 416-420.
- A8. Релаксированные  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$  буферные слои, выращенные методом газофазной эпитаксии при атмосферном давлении / Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, О.А.Кузнецов, З.Ф. Красильник, А.В. Новиков, В.А.Перевощиков, М.В. Шалеев // *ФТТ* – 2005 – Т.47. – С.44-46.
- A9. Получение релаксированных  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$  буферных слоев с малой шероховатостью поверхности / Н.В.Востоков, Ю.Н.Дроздов, З.Ф.Красильник, О.А.Кузнецов, А.В.Новиков, В.А.Перевощиков, М.В.Шалеев // *Микроэлектроника* – 2005. – Т.34. – С. 1-8.
- A10. Ge self-assembled islands grown on SiGe/Si(001) relaxed buffer layers / M.V. Shaleev, A.V. Novikov, O.A. Kuznetsov, A.N. Yablonsky, N.V. Vostokov, Yu.N. Drozdov, D.N. Lobanov, Z.F. Krasilnik // *Materials Science and Engineering B* – 2005. – V. 124-125C – P. 466-469.
- A11. Влияние предосаждения  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слоя на рост Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков / Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский // *ФТТ* – 2005. – Т.47 – С.29-32.
- A12. Growth and photoluminescence of Ge(Si) self-assembled islands obtained during the deposition of Ge on a strained SiGe layer / D.N. Lobanov, A.V. Novikov, N.V. Vostokov, Y.N. Drozdov, A.N. Yablonskiy, Z.F. Krasilnik, M. Stoffel, U. Denker, O.G. Schmidt // *Optical Materials* – 2005. – V. 27. – P. 818-821.
- A13. Особенности фотолюминесценции Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков, выращенных на напряженном  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слое / Ю.Н.Дроздов, З.Ф.Красильник, Д.Н.Лобанов, А.В.Новиков, М.В.Шалеев, А.Н.Яблонский // *ФТП* – 2006. – Т.40. – С. 343-346.
- A14. Особенности формирования Ge(Si) островков на релаксированных  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$  буферных слоях / Н.В.Востоков, Ю.Н.Дроздов, З.Ф.Красильник, О.А.Кузнецов, Д.Н.Лобанов, А.В.Новиков, М.В.Шалеев // *ФТП* – 2006 – Т.40. – С. 235-239.
- A15. Photoluminescence of Ge(Si) self-assembled islands embedded in a tensile-strained Si layer M.V. Shaleev, A.V. Novikov, A.N. Yablonskiy, Y.N. Drozdov, D.N. Lobanov, Z.F.Krasilnik, O.A. Kuznetsov // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – V.88. – 2006.
- A16. Влияние напряженного Si слоя на фотолюминесценцию Ge(Si) самоформирующихся островков, выращенных на релаксированных

- SiGe/Si(001) буферных слоях / М.В. Шалеев, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский, О.А. Кузнецов, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник // ФТП – 2007. – Т.41. – С.172-176.
- A17. Photoluminescence of dome and hut shaped Ge(Si) self-assembled islands embedded in a tensile-strained Si layer / M. V. Shaleev, A. V. Novikov, A. N. Yablonskiy, Y. N. Drozdov, D. N. Lobanov, Z. F. Krasilnik, O. A. Kuznetsov // Appl. Phys. Lett. – 2007. – V.91. – P. 021916-3.
- A18. Влияние температуры роста на фотолюминесценцию самоформирующихся островков Ge(Si), заключенных между напряженными слоями Si / М.В. Шалеев, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский, О.А. Кузнецов, Ю.Н. Дроздов, Д.Н.Лобанов, З.Ф. Красильник // ФТП – 2007. – Т.41. – С.1375-1380.
- A19. Intense photoluminescence from Ge(Si) self-assembled islands embedded in a tensile-strained Si layer / A.V. Novikov, M.V. Shaleev, A.N. Yablonskiy, O.A. Kuznetsov, Yu.N. Drozdov, D.N. Lobanov, Z.F. Krasilnik // Semicond. Sci. and Technol. – 2007 – V. 22. – P. S29-S32.
- A20. Effect of growth temperature on photoluminescence of Ge(Si) self-assembled islands embedded in a tensile-strained Si layer / M.V. Shaleev, A.V. Novikov, A.N. Yablonskiy, Y.N. Drozdov, O.A. Kuznetsov, D.N. Lobanov, Z.F. Krasilnik // Thin Solid Films – 2008. – V. 517. – P. 385–387.
- A21. Сравнительный анализ фото- и электролюминесценции многослойных структур с самоформирующимися островками Ge(Si)/Si(001) / Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, К.Е. Кудрявцев, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, Д.В. Шенгуров, В.Б. Шмагин, А.Н. Яблонский // ФТП – 2008. – Т. 42. – С. 291-295.
- A22. Comparative analysis of photo- and electroluminescence of multilayer structures with Ge(Si)/Si(001) self-assembled islands / Yu.N. Drozdov, Z.F. Krasilnik, К.Е. Kudryavtsev, D.N. Lobanov, A.V. Novikov, M.V. Shaleev, D.V. Shengurov, V.B. Shmagin, A.N. Yablonskiy // Thin Solid Films – 2008. – V. 517. – P. 398–400.
- A23. Влияние параметров Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков на их электролюминесценцию при комнатной температуре / Д.Н.Лобанов, А.В.Новиков, К.Е.Кудрявцев, Д.В.Шенгуров, Ю.Н.Дроздов, А.Н.Яблонский, В.Б.Шмагин, З.Ф.Красильник, N.D.Zakharov, P.Werner // ФТП – 2009. – Т. 43. – С.332-336.
- A24. Electroluminescence and photoconductivity of GeSi heterostructures with self-assembled islands in the wavelength range 1.3–1.55  $\mu\text{m}$  / D.N. Lobanov, A.V. Novikov, К.Е. Kudryavtsev, A.N. Yablonskiy, A.V. Antonov, Yu.N. Drozdov,



- D.V. Shengurov, V.B. Shmagin, Z.F. Krasilnik, N.D. Zakharov, P. Werner // *Physica E* – 2009. – V.41. – P. 935-938.
- A25. D.V. Yurasov. Features of two-dimensional to three-dimensional growth mode transition of Ge in SiGe/Si(001) heterostructures with strained layers / D. V. Yurasov, Yu. N. Drozdov, M. V. Shaleev, A. V. Novikov // *Appl. Phys. Lett.* – 2009. – V. 95. – P. 151902-3.
- A26. Влияние упругих напряжений в подслоях на критическую толщину перехода по Странскому-Крастанову в системе GeSi/Si(001) / Ю.Н. Дроздов, Д.Н. Лобанов, А.И.Никифоров, А.В. Новиков, В.В. Ульянов, Д.В. Юрасов // *Поверхность: РСНИ* – 2009. – № 7. – С. 61-66.
- A27. Исследование перехода эпитаксиальной пленки Ge от послойного к трехмерному росту в гетероструктурах с напряженными SiGe подслоями / Ю.Н. Дроздов, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, Д.В. Юрасов // *ФТП* – 2010. – Т. 44. – С.538-543.
- A28. Gigantic uphill diffusion during self-assembled growth of Ge quantum dots on strained SiGe sublayers / M.Ya.Valakh, P.M. Lytvyn, A.S. Nikolenko, V.V. Strelchuk, Z.F. Krasilnik, D.N. Lobanov, A.V. Novikov // *Appl. Phys. Lett.* – 2010. – V. 96. – P. 141909-3.
- A29. Влияние радиационного воздействия на люминесцентные свойства низкоразмерных SiGe/Si(001) гетероструктур / А.В. Новиков, А.Н. Яблонский, В.В. Платонов, С.В. Оболенский, Д.Н. Лобанов, З.Ф. Красильник // *ФТП* – 2010. – Т. 44. – С. 346-351.
- A30. SiGe nanostructures with self-assembled islands for Si-based optoelectronics / Z.F. Krasilnik, A.V. Novikov, D.N. Lobanov, K.E. Kudryavtsev, A.V. Antonov, S.V. Obolenskiy, N.D. Zakharov, P Werner // *Semicond. Sci. Technol.* – 2011. – V. 26. – P. 014029-5.
- A31. Сравнительный анализ радиационного воздействия на электролюминесценцию кремния и SiGe/Si(001) гетероструктур с самоформирующимися наноструктурами / З.Ф. Красильник, К.Е. Кудрявцев, А.Н. Качемцев, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, С.В. Оболенский, Д.В. Шенгуров // *ФТП* – 2011. – Т. 45. – С. 230-234.
- A32. Ширина линии фотолюминесценции от Ge(Si) самоформирующихся островков, заключенных между напряженными Si слоями / М.В. Шалеев, А.В. Новиков, Н.А. Байдакова, А.Н. Яблонский, О.А. Кузнецов, Д.Н. Лобанов, З.Ф. Красильник / *ФТП* – 2011. – Т. 45. – С. 202-206.
- A33. Narrow photoluminescence peak from Ge(Si) islands embedded between tensile-strained Si layers / M. Shaleev, A. Novikov, N. Baydakova, A. Yablonskiy, O.

- Kuznetsov, Y. Drozdov, D. Lobanov, Z. Krasilnik // *Physica Status Solidi C* – 2011. – V.8. – P. 1055-1059.
- A34. Usage of antimony segregation for selective doping of Si in molecular beam epitaxy / D.V. Yurasov, M.N. Drozdov, A.V. Murel, M. V. Shaleev, N. D. Zakharov, A. V. Novikov // *J. Appl. Phys.* – 2011. – V. 109. – P. 113533-7.
- A35. Метод селективного легирования кремния сегрегирующими примесями / Д.В. Юрасов, М. Н. Дроздов, А.В. Мурель, А.В. Новиков // *Письма в ЖТФ* – 2011. – Т. 37. – С. 75-81.
- A36. Transition from planar to island growth mode in SiGe structures fabricated on SiGe/Si(001) strain-relaxed buffers / M.V. Shaleev, A.V. Novikov, D.V. Yurasov, J.M. Hartmann, O.A. Kuznetsov, D.N. Lobanov, Z.F. Krasilnik // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – V. 101. – P. 151601-3.
- A37. Эффекты латерального упорядочения самоорганизованных наноструктур SiGe, выращенных на напряженных буферных слоях  $Si_{1-x}Ge_x$  / В.В. Стрельчук, А.С. Николенко, П.М. Литвин, В.П. Кладько, А.И. Гудыменко, М.Я. Валах, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков // *ФТП* – 2012. – Т. 46. – С. 665-672.
- A38. Влияние толщины кремниевого разделительного слоя на электролюминесценцию многослойных структур с Ge(Si)/Si(001) самоформирующимися островками / Д.Н.Лобанов, А.В.Новиков, К.Е.Кудрявцев, М.В.Шалеев, Д.В.Шенгуров, З.Ф.Красильник, Н.Д.Захаров, P.Werner // *ФТП* – 2012. – Т.46. – С. 1448-1452.
- A39. Послойный анализ структур с дельта-слоями методом ВИМС с учетом функции разрешения по глубине TOF.SIMS-5 / Дроздов Ю.Н., Дроздов М.Н., Новиков А.В., Юнин П.А., Юрасов Д.В. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* – 2012. – № 7. – С. 26-30.
- A40. Способ учета параметра сдвига при восстановлении распределения состава полупроводниковых структур по глубине в методе ВИМС / П.А. Юнин, Ю.Н. Дроздов, М.Н. Дроздов, А.В. Новиков, Д.В. Юрасов // *ФТП* – 2012. – Т.46. – С. 1515-1520.
- A41. Модификация высоты барьера в диодах Шоттки на кремнии при использовании сильнолегированных 3D- и 2D-слоёв / А. В. Мурель, А.В. Новиков, В. И. Шашкин, Д.В. Юрасов // *ФТП* – 2012. – Т.46. – С. 1384-1387.
- A42. Переход от двумерного к трехмерному росту пленки Ge при ее осаждении на релаксированные SiGe/Si(001) буферные слои / М.В. Шалеев, А.В. Новиков,

- Д.В. Юрасов, J.M. Hartmann, О.А. Кузнецов, Д.Н. Лобанов, З.Ф. Красильник // ФТП – 2013. – Т. 47. – С. 404-409.
- A43. Дроздов М.Н., Сегрегация сурьмы в напряженных SiGe-гетероструктурах, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии / М.Н. Дроздов, А.В. Новиков, Д.В. Юрасов // ФТП – 2013. – Т. 47. – С. 1493-1496.
- A44. Segregation of Sb in SiGe heterostructures grown by molecular beam epitaxy: interdependence of growth conditions and structure parameters / D.V. Yurasov, M.N. Drozdov, N.D. Zakharov, A.V. Novikov // J. of Crystal Growth – 2014. – V. 396. – P. 66-70.
- A45. Спектры возбуждения и кинетика фотолюминесценции в структурах с самоформирующимися Ge(Si) наноструктурами / А.Н. Яблонский, Н.А. Байдакова, А.В. Новиков, Д.Н. Лобанов, М.В. Шалеев // ФТП – 2015. – Т.49. – С. 1458-1462.
- A46. Рост светоизлучающих SiGe гетероструктур на подложках «напряженный кремний на изоляторе» с тонким слоем окисла / Н.А. Байдакова, А.И. Бобров, М.Н. Дроздов, А.В. Новиков, Д.А. Павлов, М.В. Шалеев, П.А. Юнин, Д.В. Юрасов // ФТП – 2015. – Т. 49. – С. 1129-1135.
- A47. Real-time measurement of substrate temperature in molecular beam epitaxy using low-coherence tandem interferometry / D.V. Yurasov, A.Yu. Luk'yanov, P.V. Volkov, A.V. Goryunov, A.D. Tertyshnik, M.N. Drozdov, A.V. Novikov // J. Crystal Growth – 2015. – V. 413. – P. 42-45.
- A48. Сегрегация Sb в Ge эпитаксиальных слоях и ее использование для селективного легирования структур на основе германия / А. В. Антонов, М.Н. Дроздов, А. В. Новиков, Д. В. Юрасов // ФТП – 2015. – Т. 49. – С. 1453-1457.
- A49. Antimony segregation in Ge and formation of n-type selectively doped Ge films in molecular beam epitaxy / D.V. Yurasov, A.V. Antonov, M.N. Drozdov, V.B. Schmagin, K.E. Spirin, A.V. Novikov // J. Appl. Phys. – 2015. – V.118. – P.145701-6.
- A50. Влияние шероховатости поверхности на смену режима роста с двумерного на трехмерный в SiGe напряженных гетероструктура / А.В. Новиков, М.В. Шалеев, Д.В. Юрасов, П.А. Юнин //ФТП – 2016. – Т. 50. – С. 1657-1661.
- A51. Features of SOI substrates heating in MBE growth process obtained by low-coherence tandem interferometry / P.V. Volkov, A.V. Goryunov, D.N. Lobanov, A.Yu. Lukyanov, A.V. Novikov, A.D. Tertyshnik, M.V. Shaleev, D. V. Yurasov // J. Cryst. Growth – 2016. – V. 448. – P. 89-92.

- A52. Электролюминесценция структур с самоформирующимися Ge(Si) наноструктурами, заключенными между напряженными слоями кремния / Н.А. Байдакова, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, М.В. Юрасов, Е.Е. Морозова, Д.В. Шенгуров, З.Ф. Красильник // ФТП – 2016. – Т. 50. – С. 1685-1689.
- A53. Quantum dot emission driven by Mie resonances in silicon nanostructures / V. Rutckaia, F. Heyroth, A. Novikov, M. Shaleev, M. I. Petrov, J. Schilling // Nano Letters. – 2017. – V.17. – P.6886–6892.
- A54. Light emission from Ge(Si)/SOI self-assembled nanoislands embedded in photonic crystal slabs of various period with and without cavities / M.V. Stepikhova, A.V. Novikov, A.N. Yablonskiy, M.V. Shaleev, D.E. Utkin, V.V. Rutckaia, E.V. Skorokhodov, S.M. Sergeev, D.V. Yurasov, Z.F. Krasilnik // Semiconductor Science and Technology. – 2019. – V.34. – P.024003-7.

### Список цитируемой литературы

1. Gossmann H.-J., Delta doping in silicon / H.-J. Gossmann, E. F. Schubert // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences – 1993 – V. 18 – P. 1-67.
2. Алферов Ж.И., История и будущее полупроводниковый гетероструктур / Ж.И. Алферов // Физика и техника полупроводников – 1998 – Т. 32 –С. 3-18.
3. Rücker H., High-performance SiGe HBTs for next generation BiCMOS technology / H.Rücker, B. Heinemann // Semiconductors Science and Technology – 2018 – V. 33 – P.114003-6.
4. A new field-effect transistor with selectively doped GaAs/n-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterojunctions / Т.Мimura, S.Нiyamizu, Т.Fujii, К.Nanbu // Japanese Journal of Applied Physics- 1980 - V. 19 – P. L225-L227.
5. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры. Обзор / Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Щукин В.А., Копьев П.С., Алферов Ж.И., Бимберг Д. // Физика и техника полупроводников – 1998 – Т. 32 –С. 385-410.
6. Quantum cascade laser / J.Faist, F.Capasso, D. L.Sivco, C.Sirtori, Hutchinson A. L., A. Y. Cho // Science -1994 – V. 264 – P. 553-556.
7. Болховитянов Ю.Б., Кремний-германиевые эпитаксиальные пленки: физические основы получения напряженных и полностью релаксированных гетероструктур / Ю.Б.Болховитянов, О.П.Пчеляков, С.И. Чикичев // Успехи физических наук – 2001 – Т. 171 – С. 689-715.
8. Brunner K., Si/Ge nanostructures / K.Brunner // Reports on Progress in Physics – 2002 – V. 65 – P. 27–72.
9. Growth and self-organization of SiGe nanostructures / J.-N.Aqua, I.Berbezier, L.Favre, T.Frisch, A.Ronda // Physics Reports – 2013 – V. 522 – P. 59-189.

10. Eaglesham D. J., Dislocation-Free Stranski-Krastanow Growth of Ge on Si(100) / D. J.Eaglesham, M.Cerullo // Physical Review Letters – 1990 – V. 64 – P. 1943-1946.
11. Kinetic Pathway in Stranski-Krastanov Growth of Ge on Si(001) / Y.-W.Mo, D.E.Savage, B.S.Swartzentruber, M.G.Lagally // Physical Review Letters – 1990 – V. 65 – P. 1020-1023.
12. Effect of Strain on Surface Morphology in Highly Strained InGaAs Films / C.W.Snyder, B.G.Orr, D.Kessler, L.M. Sander // Physical Review Letters – 1991 – V. 66 – P. 3032-3034.
13. Semiconductor Surface Roughness: Dependence on Sign and Magnitude of Bulk Strain / Y.H. Xie, G.H. Gilmer, C. Roland, P.J. Silverman, S.K. Buratto, J.Y. Cheng, E.A.Fitzgerald, A.R. Kortan, S.Schuppler, M.A.Marcus, P.H. Citrin // Phys. Rev. Lett. – 1994 – V. 73 – P. 3006-3009.
14. Morphology and microstructure of tensile-strained SiGe(001) thin epitaxial films / J. E. van Nostrand, D.G.Cahill, I.Petrov, J.E. Greene / J. Appl. Phys. – 1998 – V. 83 – P. 1096-1102.
15. Мощные лазеры на квантовых точках InAs-InGaAs спектрального диапазона 1.5 мкм, выращенные на подложках GaAs / М.В.Максимов и др.// Физика и техника полупроводников – 2004 – Т. 38 – С. 763-766.
16. Self-assembling quantum dots for optoelectronic devices on Si and GaAs / Eberl K., Lipinski M.O., Manz Y.M., Winter W., Jin-Phillipp N.Y., Schmidt O.G. // Physica E - 2001 - V.9 - P. 164–174.
17. Photoluminescence and electroluminescence of SiGe dots fabricated by island growth / R. Apertz, L. Vescan, A. Hartmann, C. Dieker, H. Luth// Applied Physics Letters – 1995. V. 66. – P. 445-447.
18. Size distribution and electroluminescence of self-assembled Ge dots/ L.Vescan, T.Stoica, O.Chretien, M.Goryll, E.Mateeva, and A.Muck// Journal of Applied Physics – 2000. - V. 87 – P. 7275-7282.
19. Room temperature electroluminescence from multilayer GeSi heterostructures / A. A. Tonkikh, G. E. Cirlin, V. G. Talalaev, N. D. Zakharov, P. Werner // Phys. Stat. Sol. (a) – 2006 – V.203(6) – P. 1390–1394.
20. Brehm M., Site-controlled and advanced epitaxial Ge/Si quantum dots: fabrication, properties, and applications / M. Brehm, M. Grydlik // Nanotechnology – 2017 – V.28 –P. 392001-22.
21. S. Fukatsu, Phononless radiative recombination of indirect excitons in a Ge/Si type-II quantum dot/ S.Fukatsu, H.Sunamura, Y.Shiraki, S.Komiyama// Appl. Phys. Lett. - 1997. - V. 71 – P. 258-260.

22. Самоорганизующиеся наноостровки Ge в Si, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии/ В.Я.Алешкин, Н.А.Бекин, Н.Г.Калугин, З.Ф.Красильник, А.В.Новиков, В.В.Постников, Х.Сейрингер// Письма в ЖЭТФ – 1998 - Т. 67 – С. 46-50.
23. Strain-driven alloying in Ge/Si(001) coherent islands / S.A.Chaparro, J.Drucker, Y.Zhang, D.Chandrasekhar, M.R.McCartney, D.J.Smith // Phys.Rev. Lett. – 1999 – V. 83 – P. 1199-1202.
24. The elastic strain and composition of self-assembled GeSi islands on Si (001) / Z.F.Krasil'nik, N.V.Vostokov, S.A.Gusev, I.V.Dolgov, Yu.N.Drozdo, D.N.Lobanov, L.D.Moldavskaya, A.V.Novikov, V.V.Postnikov, D.O.Filatov // Thin Solid Films – 2000 – V. 367 – P. 171-175.
25. Midinfrared photoresponse of Ge quantum dots on a strained Si<sub>0.65</sub>Ge<sub>0.35</sub> layer / A.I. Yakimov, A.I. Nikiforov, V.A. Timofeev, A.A. Bloshkin, V.V. Kirienko, A.V. Dvurechenskii // Semiconductor Science and Technology. – 2011. – V. 26. – P.085018-4.
26. Stranski-Krastanow growth of tensile strained Si islands on Ge (001) / D. Pachinger, H. Groiss, H. Lichtenberger, J. Stangl, G. Hesser, F. Schäffler // Applied Physics Letters. – 2007. – V.91. – P.233106.
27. Юрасов Д.В. Критическая толщина перехода по Странскому-Крастанову с учетом эффекта сегрегации / Д. В. Юрасов, Ю. Н. Дроздов // Физика и техника полупроводников. – 2008. – Т.42, №5. – С. 579–585.
28. Arnold C.B. Unified kinetic model of dopant segregation during vapor-phase growth / C.B. Arnold, M.J. Aziz // Physical Review B. – 2005. – V.72. – P.195419-17.
29. Ultradense phosphorus in germanium delta-doped layers / G. Scappucci, G. Capellini, W.C.T. Lee, M.Y. Simmons // Applied Physics Letters. – 2009. – V.94. – P.162106.

Новиков Алексей Витальевич

SiGe ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ, ВЫРАЩЕННЫЕ НА РАЗЛИЧНЫХ  
ПОДЛОЖКАХ: РЕЛАКСАЦИЯ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ,  
ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И СЕЛЕКТИВНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Подписано к печати «\_\_\_» 2021 г.

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур РАН – филиала  
Федерального государственного бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики  
Российской академии наук», 607680, Нижегородская область, Кстовский  
район, д. Афоново, ул. Академическая, д. 7

